



ミグダル効果観測のための 低物質量アルゴンガスTPC開発

神戸大理 金崎奎

MPGD&Active媒質TPC 研究会 2021

2021/12/17 15:35~

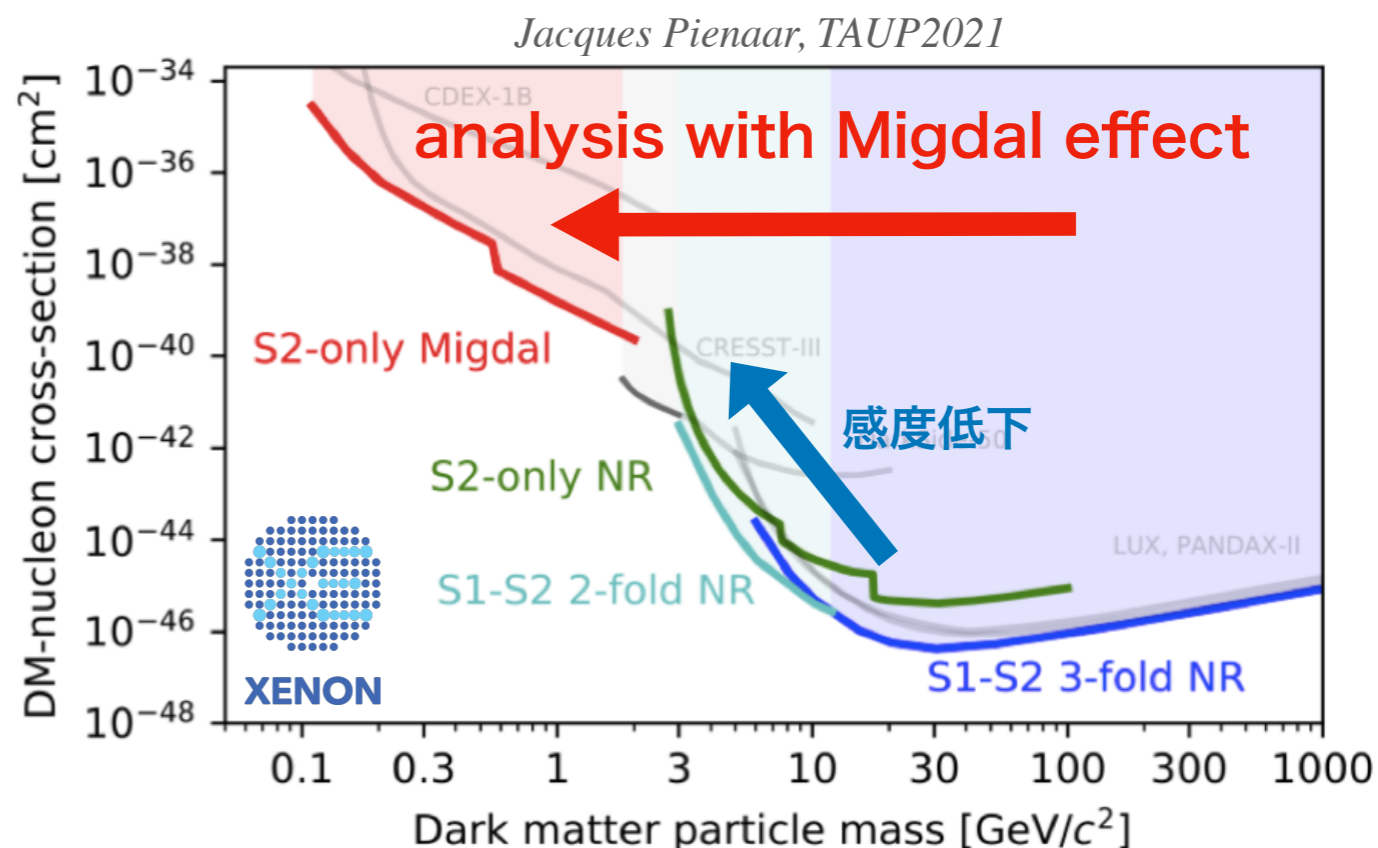
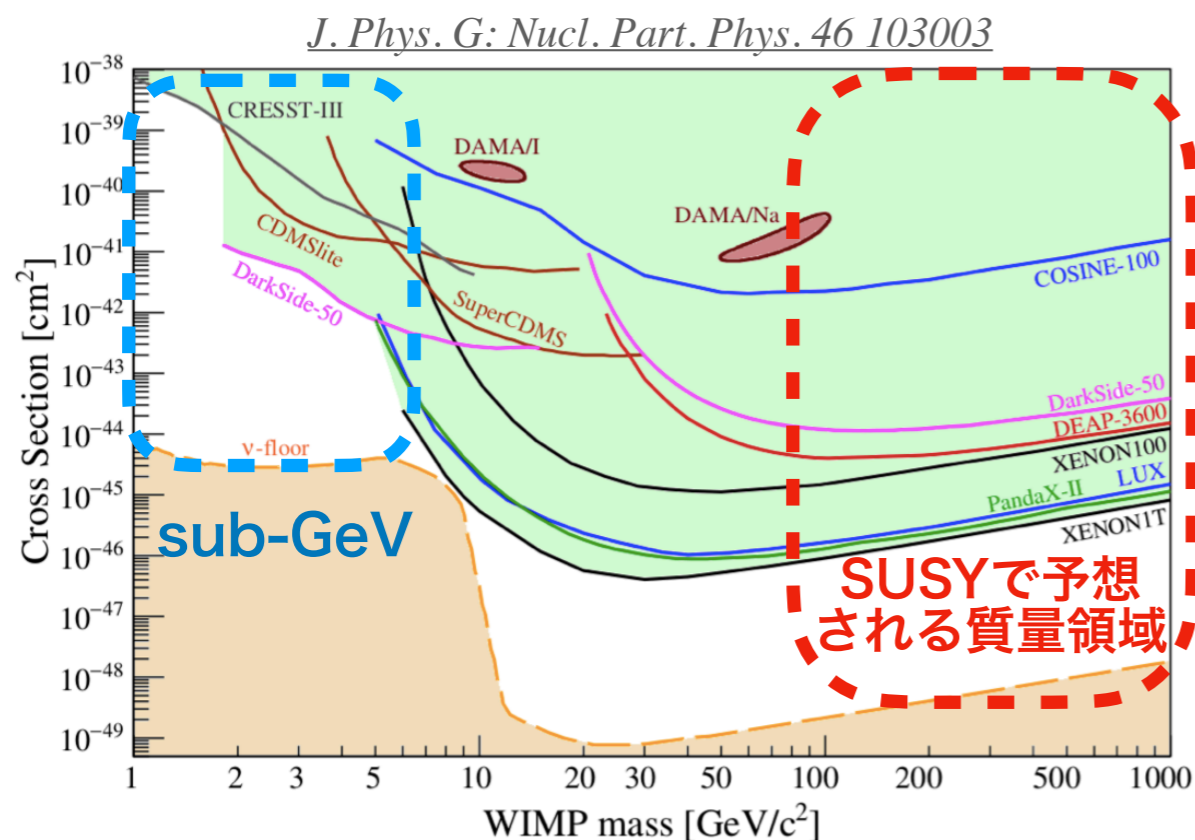
@岡山大学 理学部 1号館大会議室

1. Migdal効果
2. MIRACLUE
3. BG削減
4. 低物質量TPC
5. 抵抗性薄膜による電場形成
6. 今後の展望・まとめ

1. Migdal効果

軽い暗黒物質(DM)

- DMの有力候補として WIMPs (Weakly Interactive Massive Particle) が盛んに探索されている
- 超対称性理論から予想される質量領域 (100GeV~TeV)は特に重点的に探索が行われてきたが未発見
→ **低質量(sub-GeV以下)領域**の探索が近年のトレンド
- Migdal効果を使うと**低質量WIMPsに対する感度が大幅に向上**する



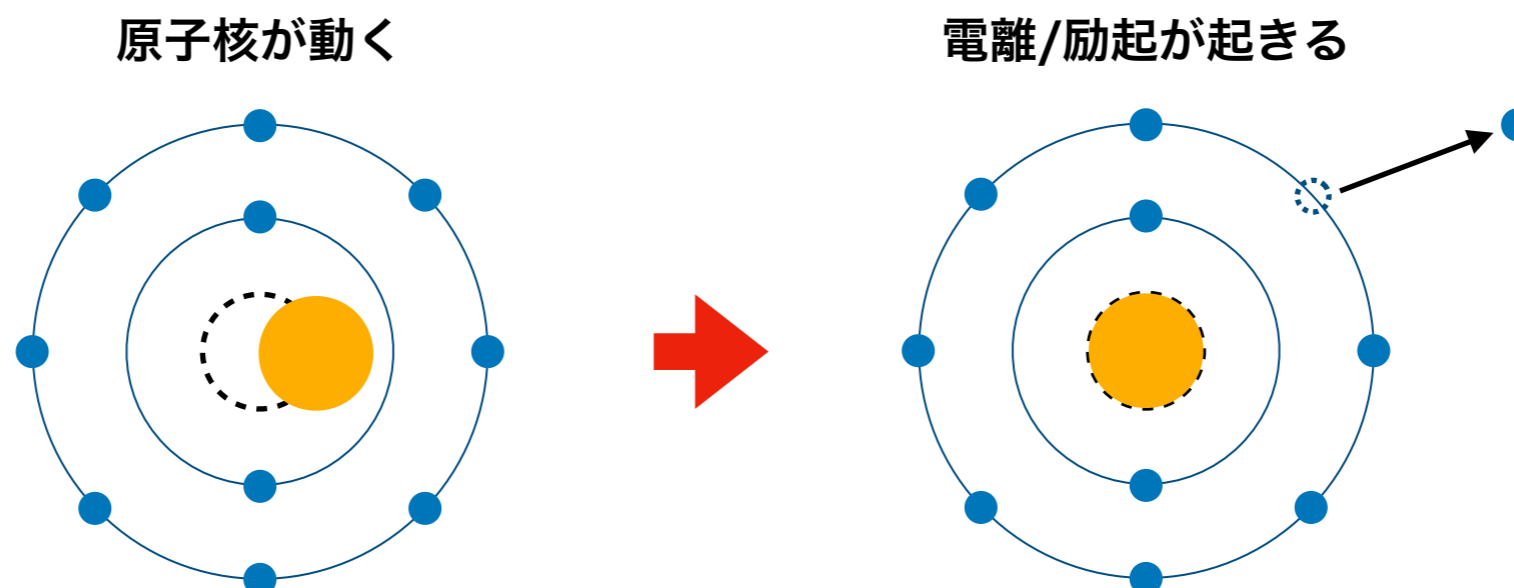
1. Migdal効果

Migdal効果とは

- A. B. Migdal が1940年ごろ提唱
- 原子核が急に動くと**低確率で電離や励起が追加で起きる**
- DM直接探索では一般に原子核の反跳をとらえる
→ 低質量WIMPによる反跳イベントは、
反跳エネルギーの低下・クエンチングにより見えにくい
→ Migdal効果による**追加の信号によって探索が可能に**



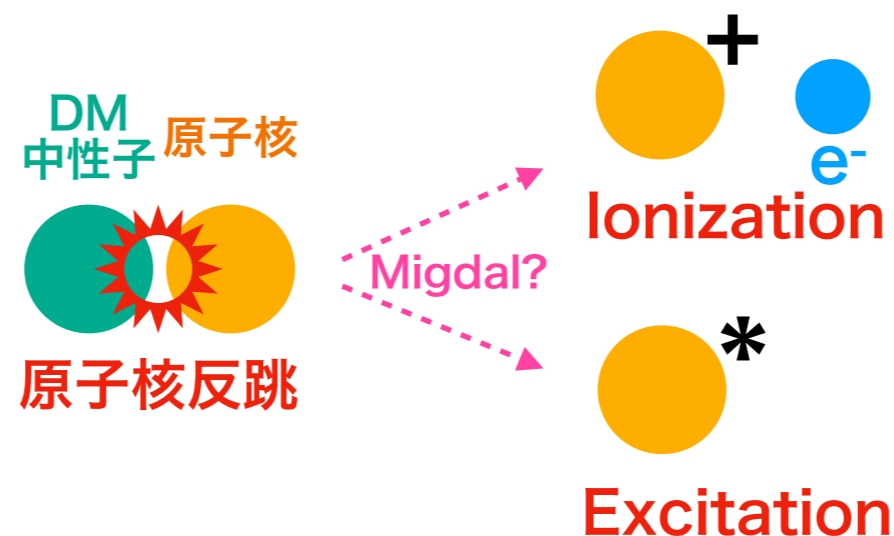
Migdal さん



1. Migdal効果

Migdal効果の問題点

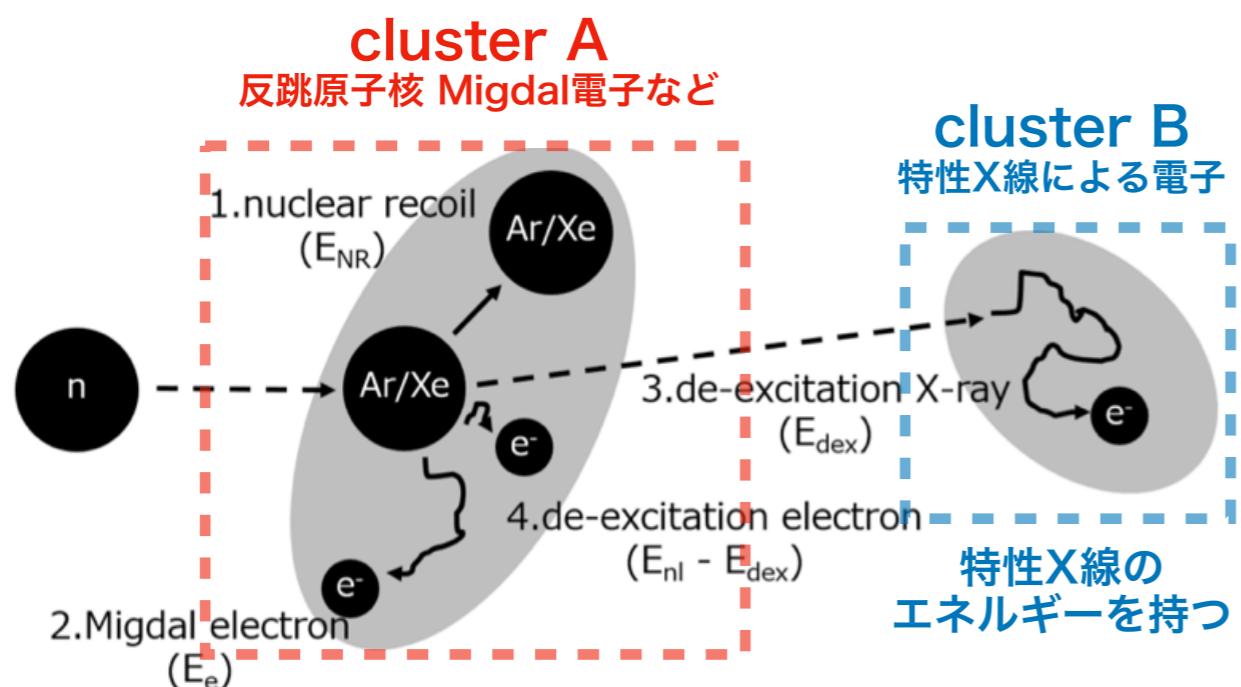
- DM探索においての問題点
 - **原子核反跳に伴うMigdal効果は観測されていない**
(α 崩壊や β 崩壊に伴うものは確認済みなので、たぶんあるはず)
- あると信じてDMに対して制限をつけている状況
- 観測できれば **DM** や **CE ν NS** 等の実験へのインパクトは大きい
 - 是非とも観測したい！



2. MIRACLUE

Migdal効果の観測

- ただの 中性子-原子核の弾性散乱でも背景事象(BG) になってしまう
- Migdal効果をいかに大量の BG と分離するかがミソ
- **K殻電離**に伴う**特性X線**放出 のプロセスに着目
→ 2-clusterの**空間的な位置関係・エネルギー**を利用して、BGを排除できそう
- 既存のガスTPCの技術を使って観測できるのでは？



自分得意です

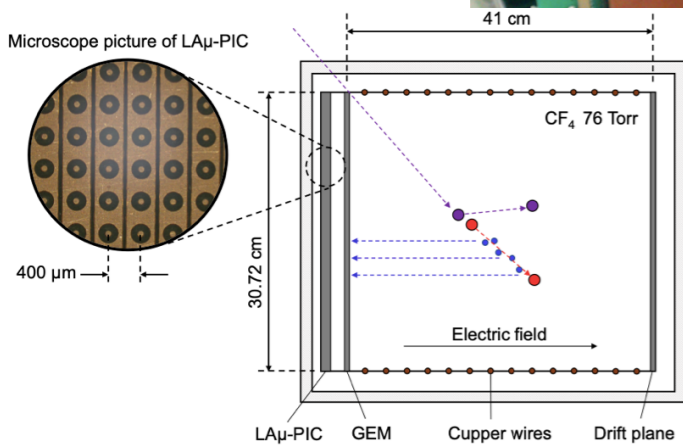
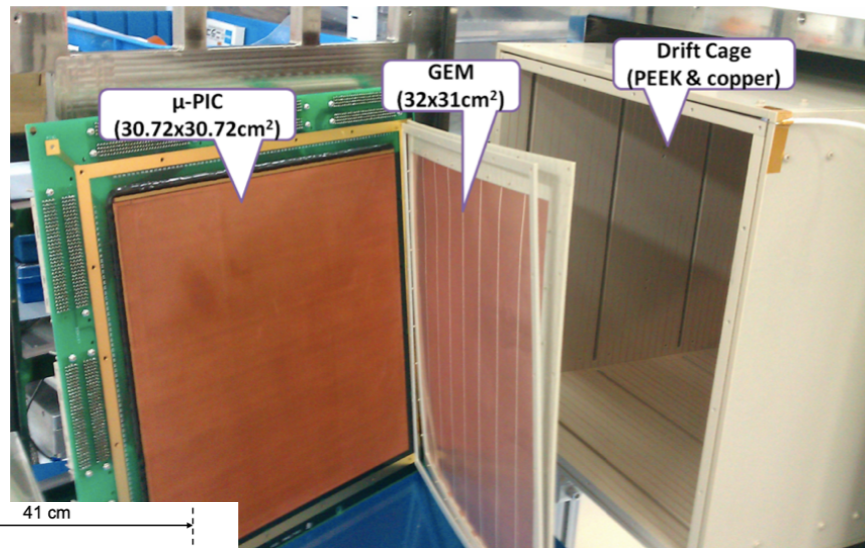


2. MIRACLUE

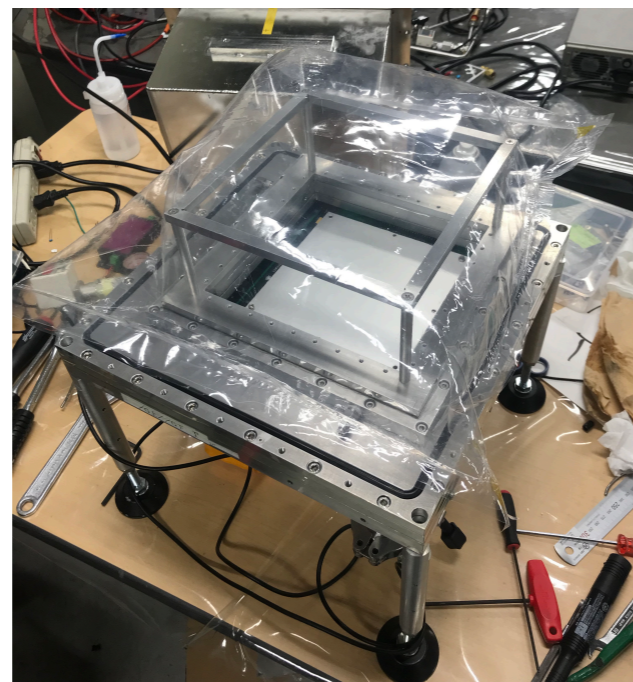
MIRACLUE Collaboration (実験代表: 東北大 中村輝石)



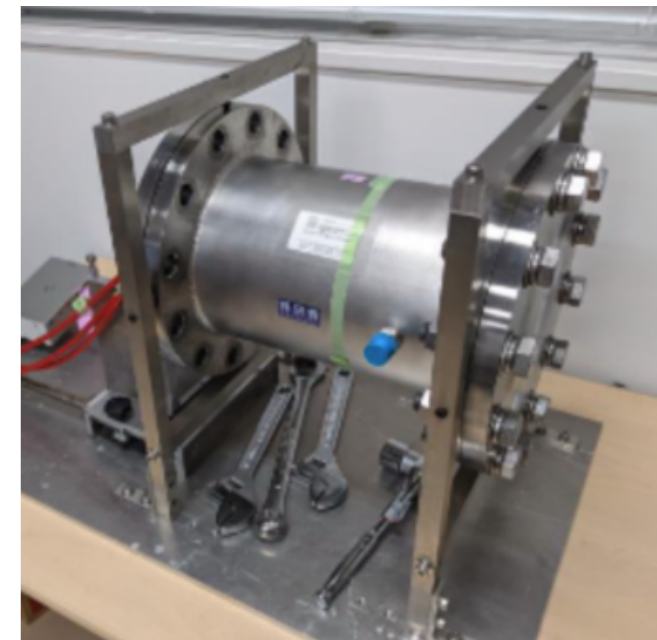
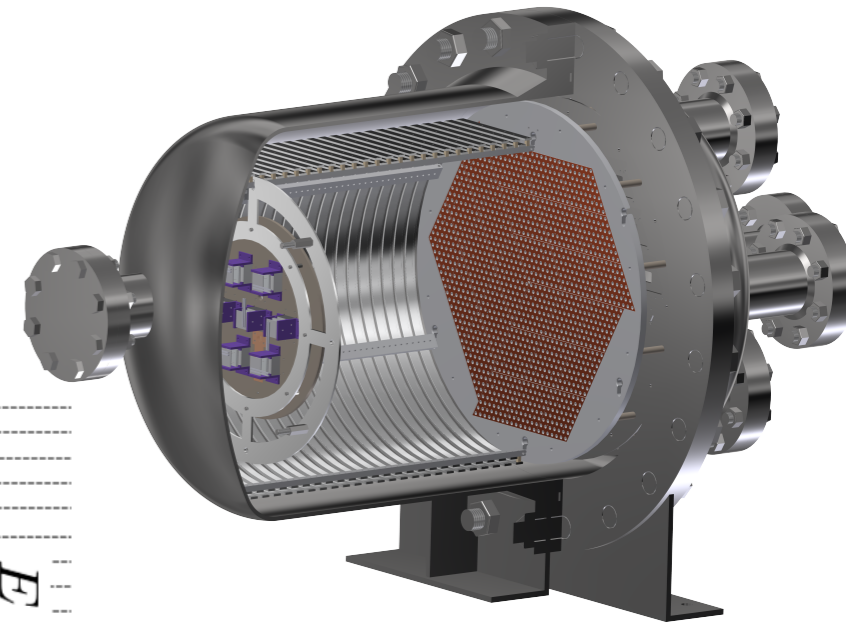
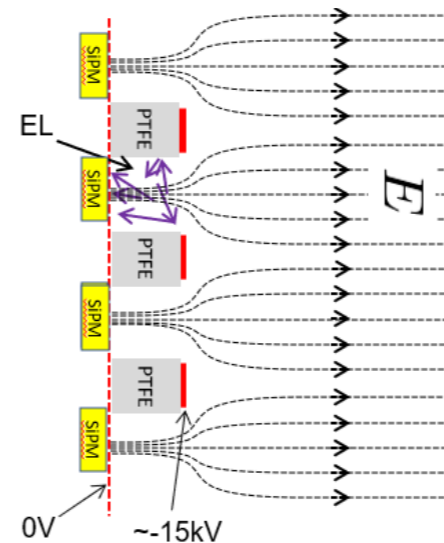
DM探索



- Ar 1atm
- GEM + μPIC
- 神戸大で開発中



0νββ探索



- 高圧Xeガス
- ELCC + MPPC
- 東北大で開発中

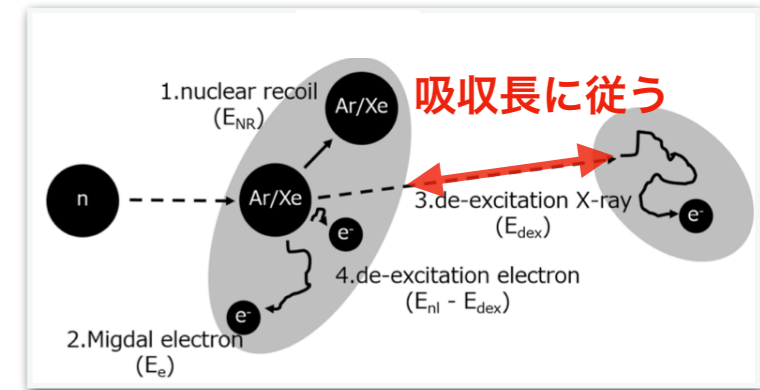
3月の初回ビーム試験に向けて鋭意準備中！

2. MIRACLUE

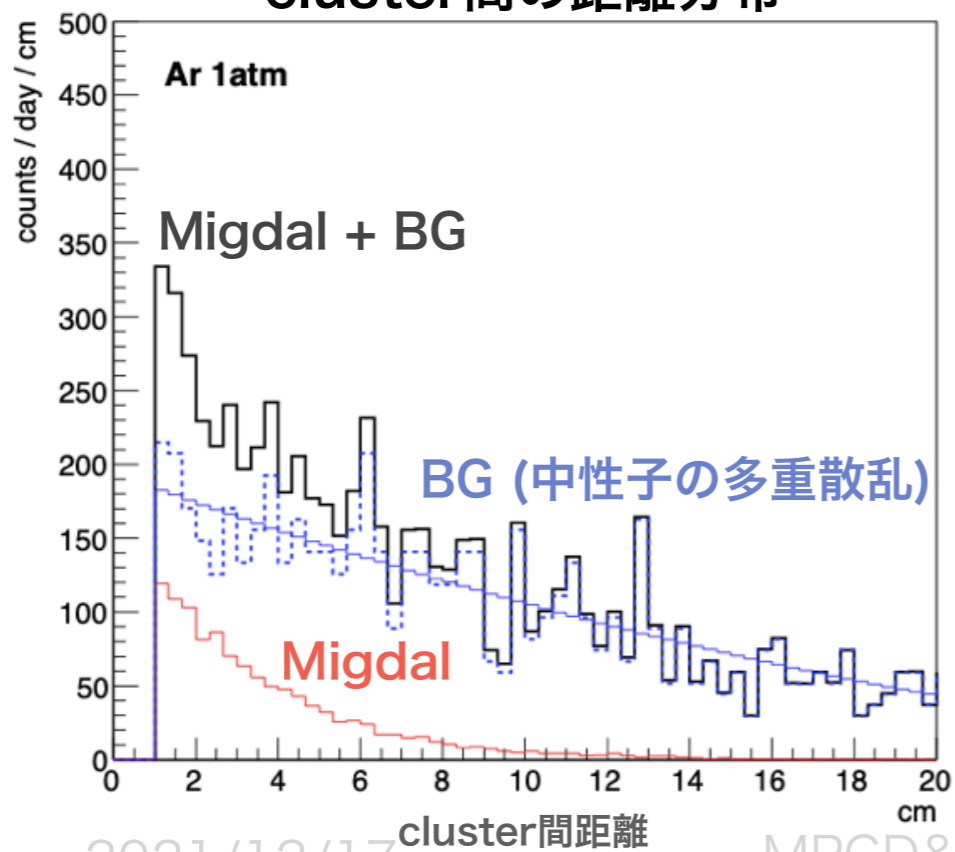
シミュレーションによる見積もり

*K.D.Nakamura et al.
PTEP, 2021(1), 013C01*

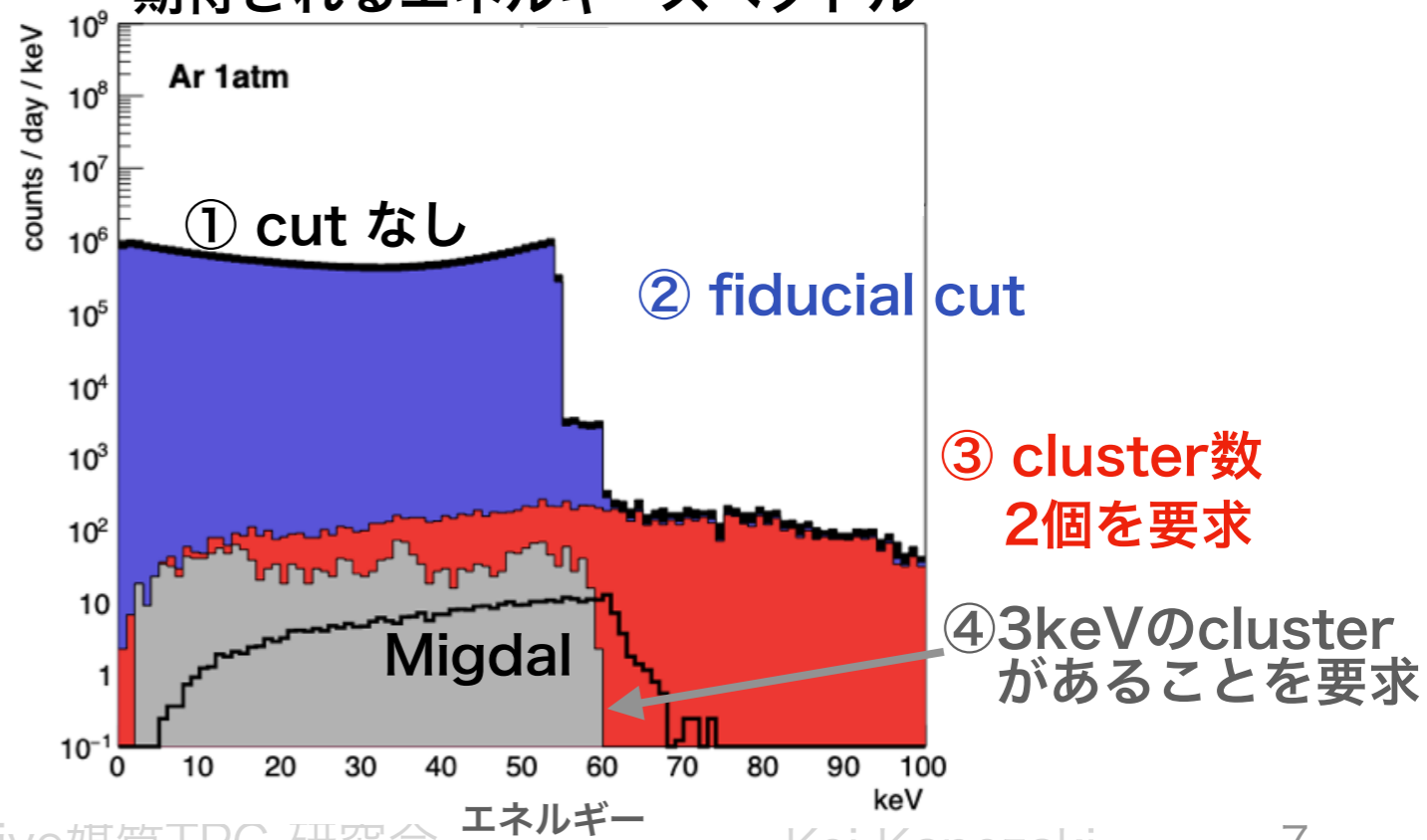
- 565keVの中性子ビームを使う方針
- 特性X線(3keV)の吸収長が 2~3cm
→ MigdalとBGで**cluster間の距離分布が異なる**
- Ar原子核と中性子の散乱のみを考えた場合**BGの数分の1のレート**
→ **外的なBGの理解・削減が重要**



cluster間の距離分布



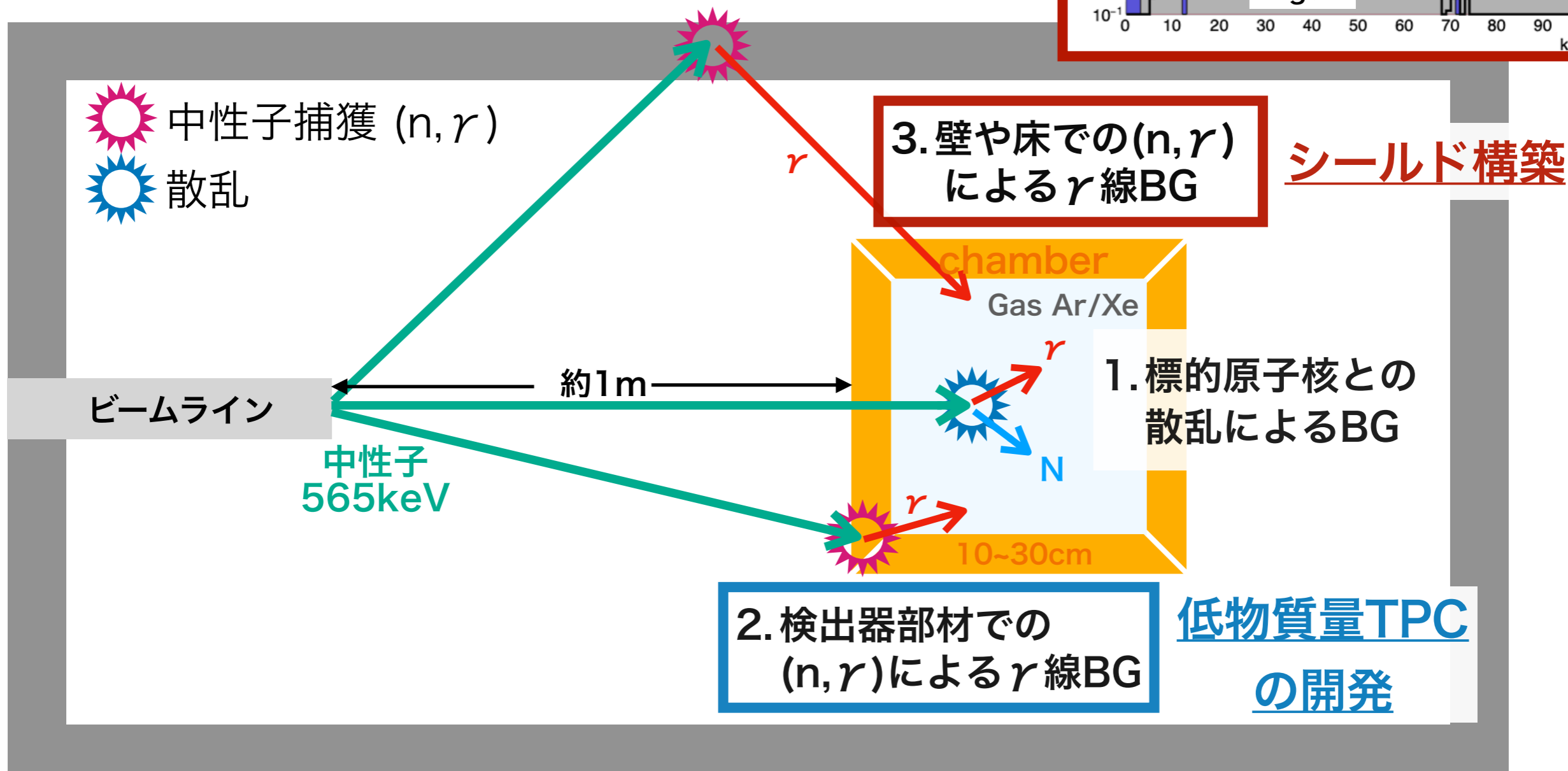
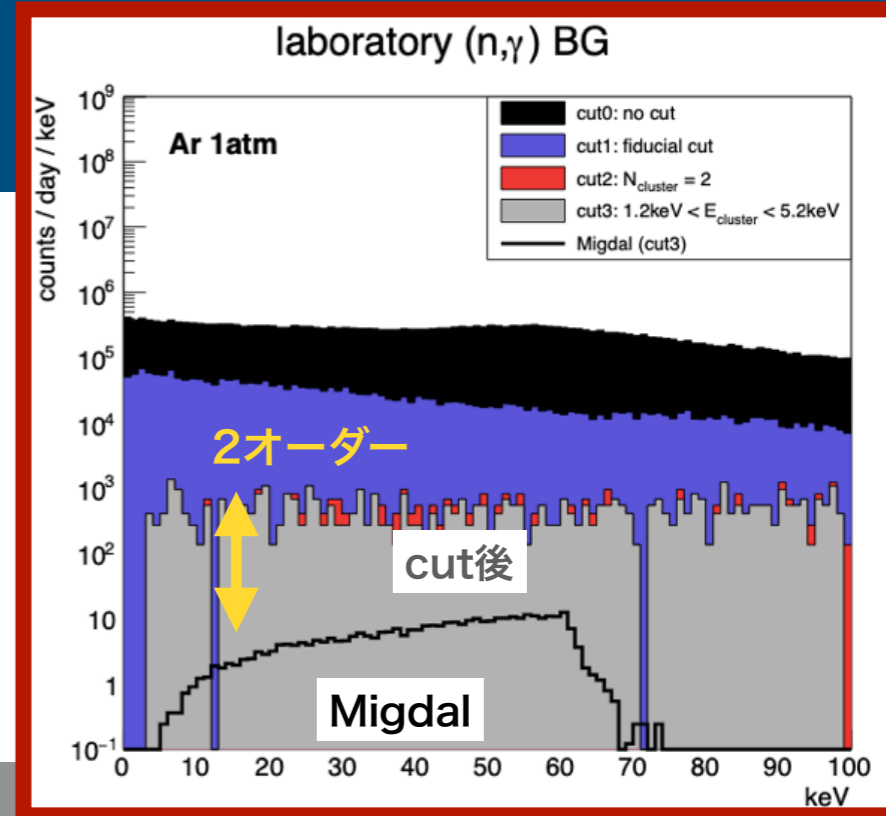
期待されるエネルギースペクトル



3. BG削減

想定しているBG

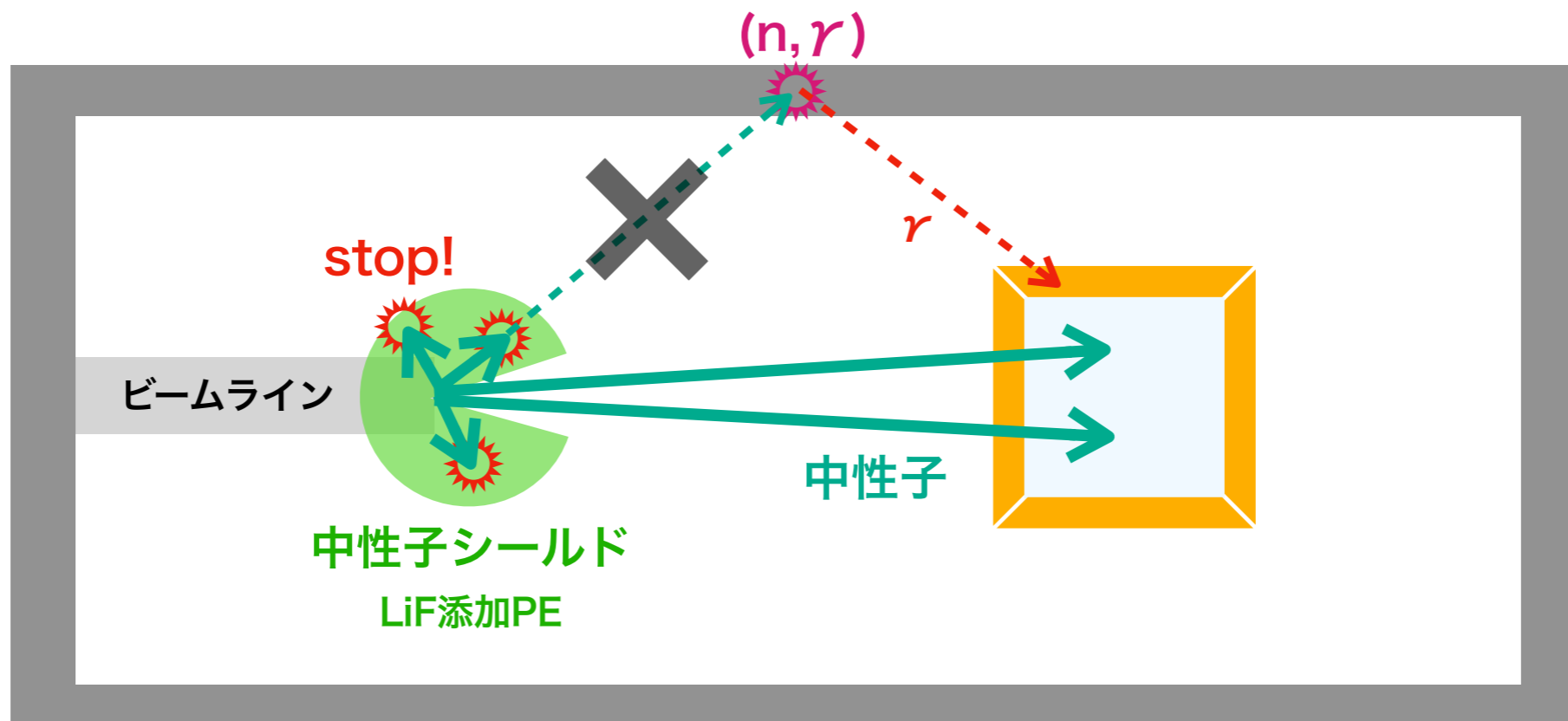
- 実験室からの γ 線BGが支配的になりそう
- 今回は**検出器由来のBG削減**がメインテーマ



3. BG削減

中性子のシールド

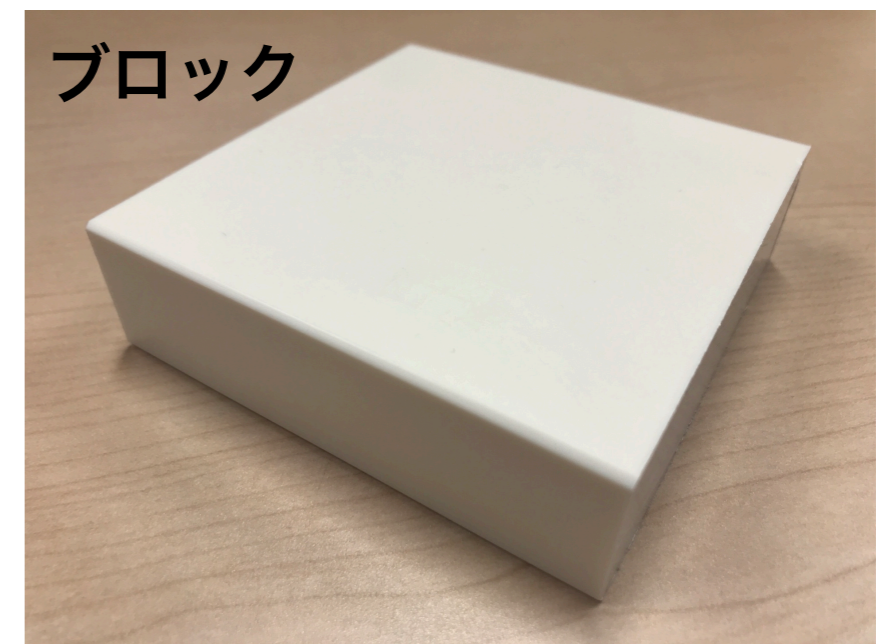
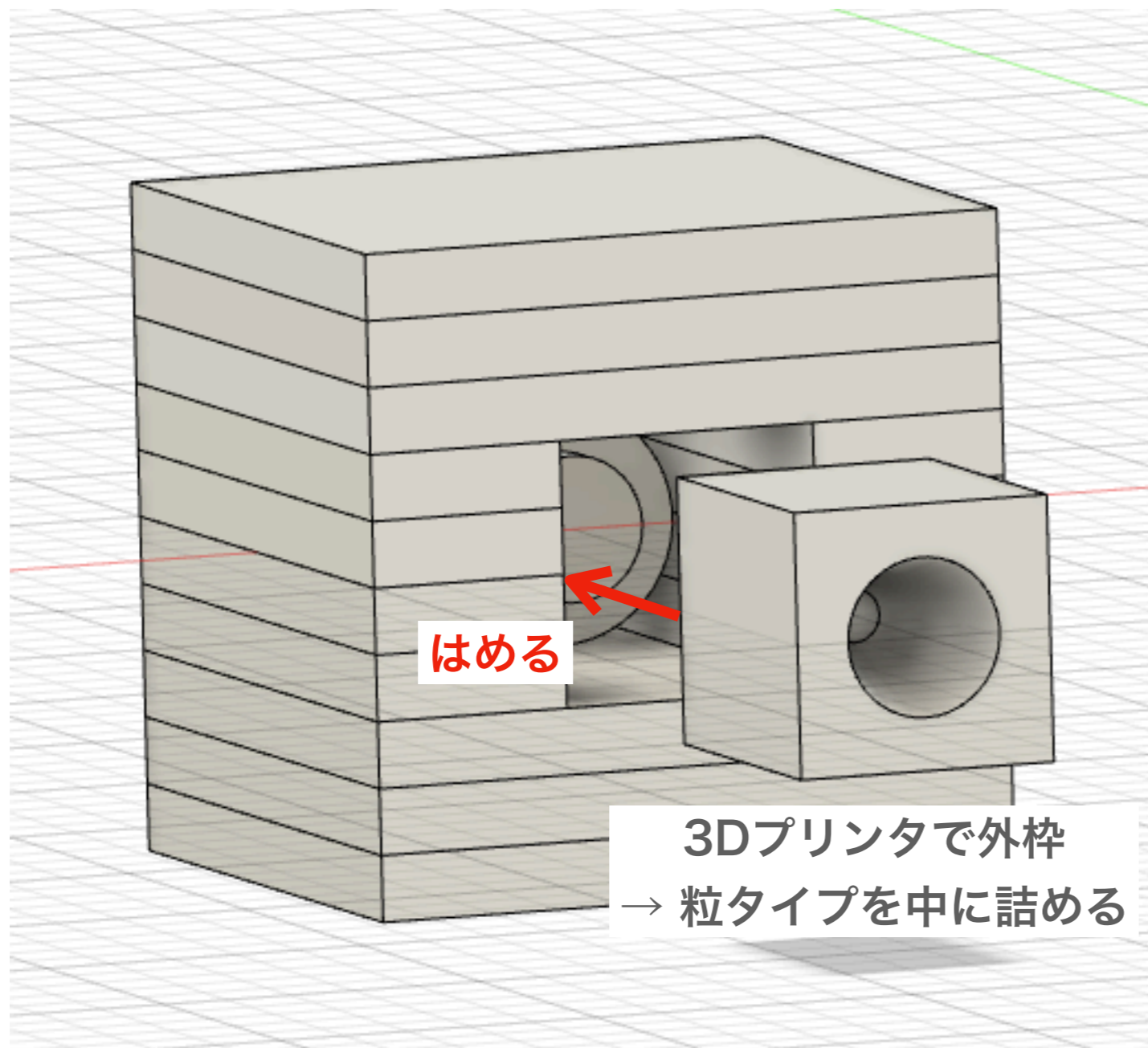
- 実験室からのBG削減のためにシールドを導入する
- 遮蔽材にはLiF添加PEを採用 ${}^6\text{Li} + n \rightarrow {}^3\text{H} + \alpha$
 - ・ 中性子捕獲の過程で γ が出ない
→ ボロン添加PEと比べて低BG化が可能
 - ・ ちょっと高い



3. BG削減

シールドのデザイン

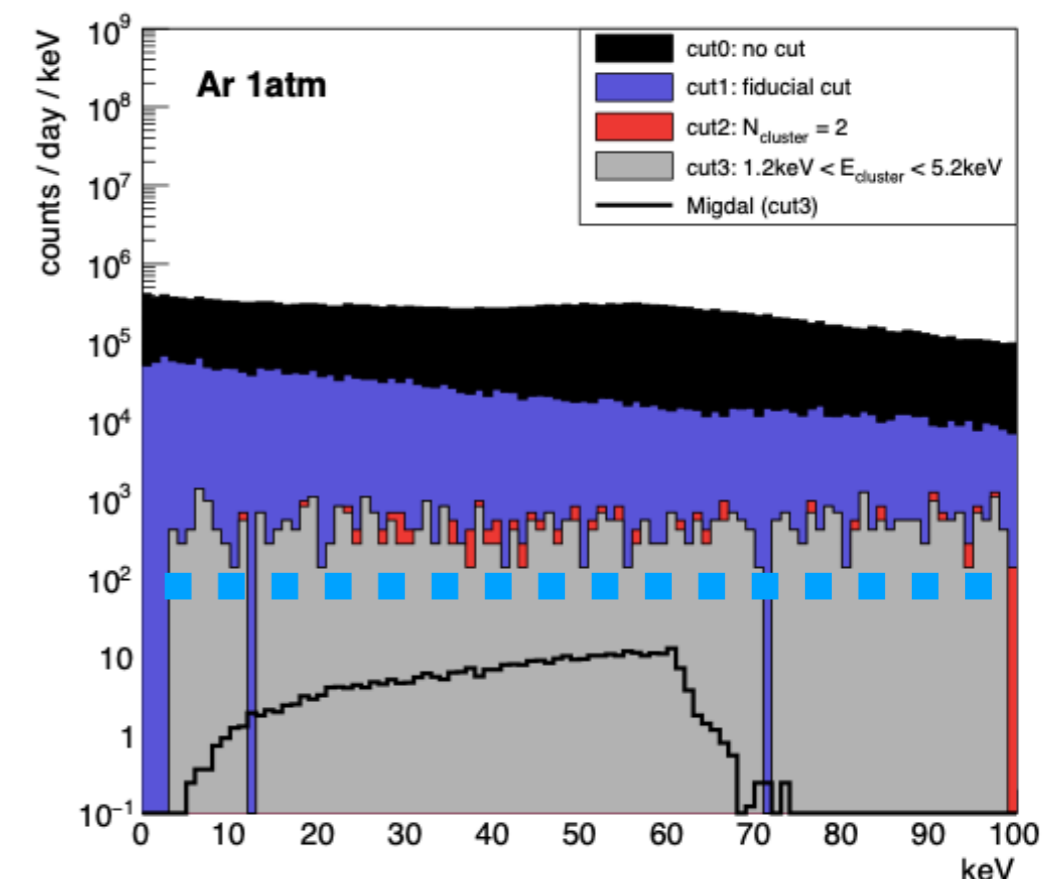
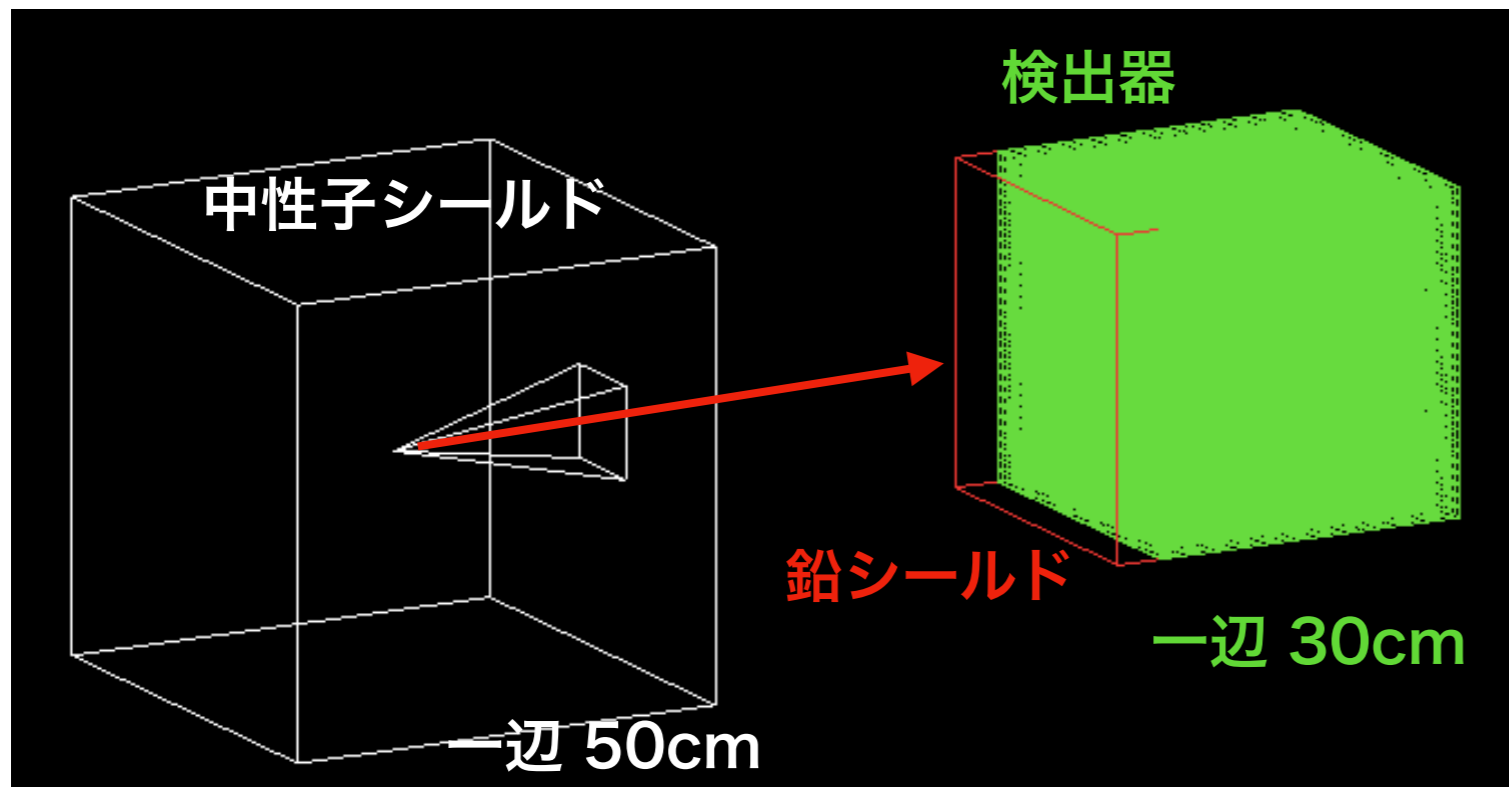
- LiF添加PE の ブロックタイプと粒タイプを組み合わせる予定



3. BG削減

γ 線シールド

- シールド内で発生した γ は鉛で遮蔽する方針
- LiF添加PE + 鉛5cm を使うとBGとしては1オーダー弱減少
- Migdal効果観測のためにはもう少し落としたい
→ 打つ手はある



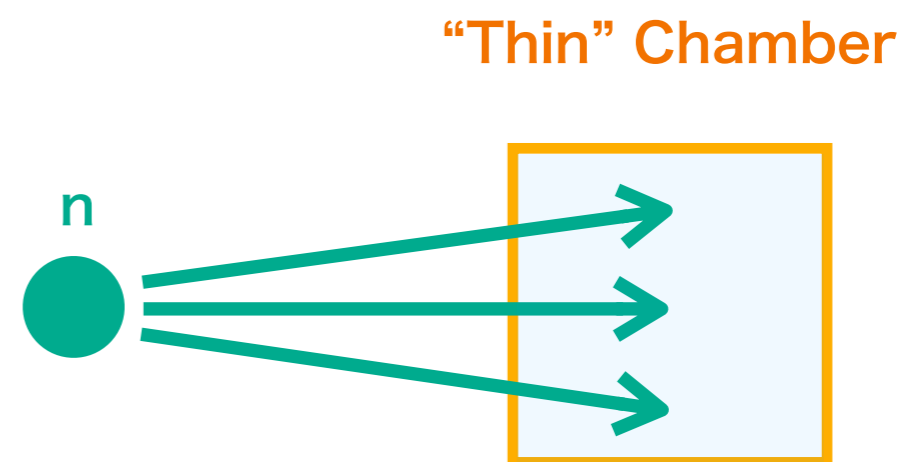
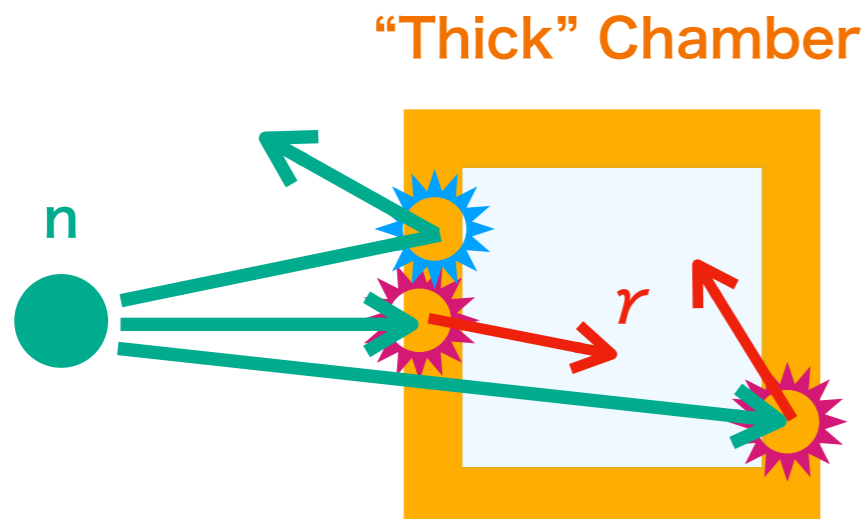
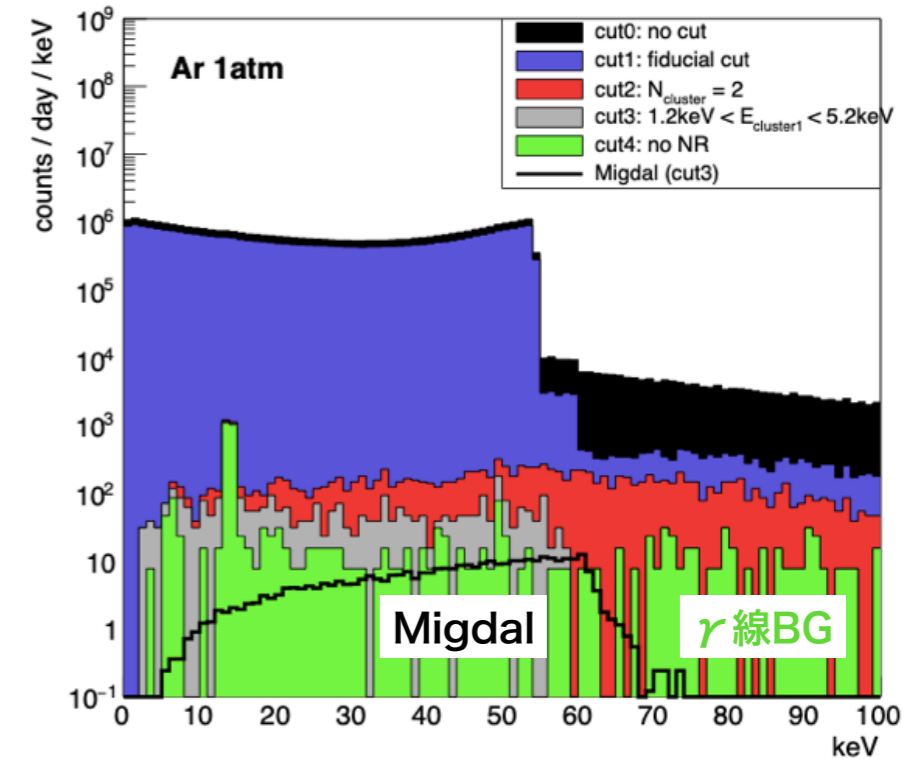


低物質暈TPC

4. 低物質質量TPC

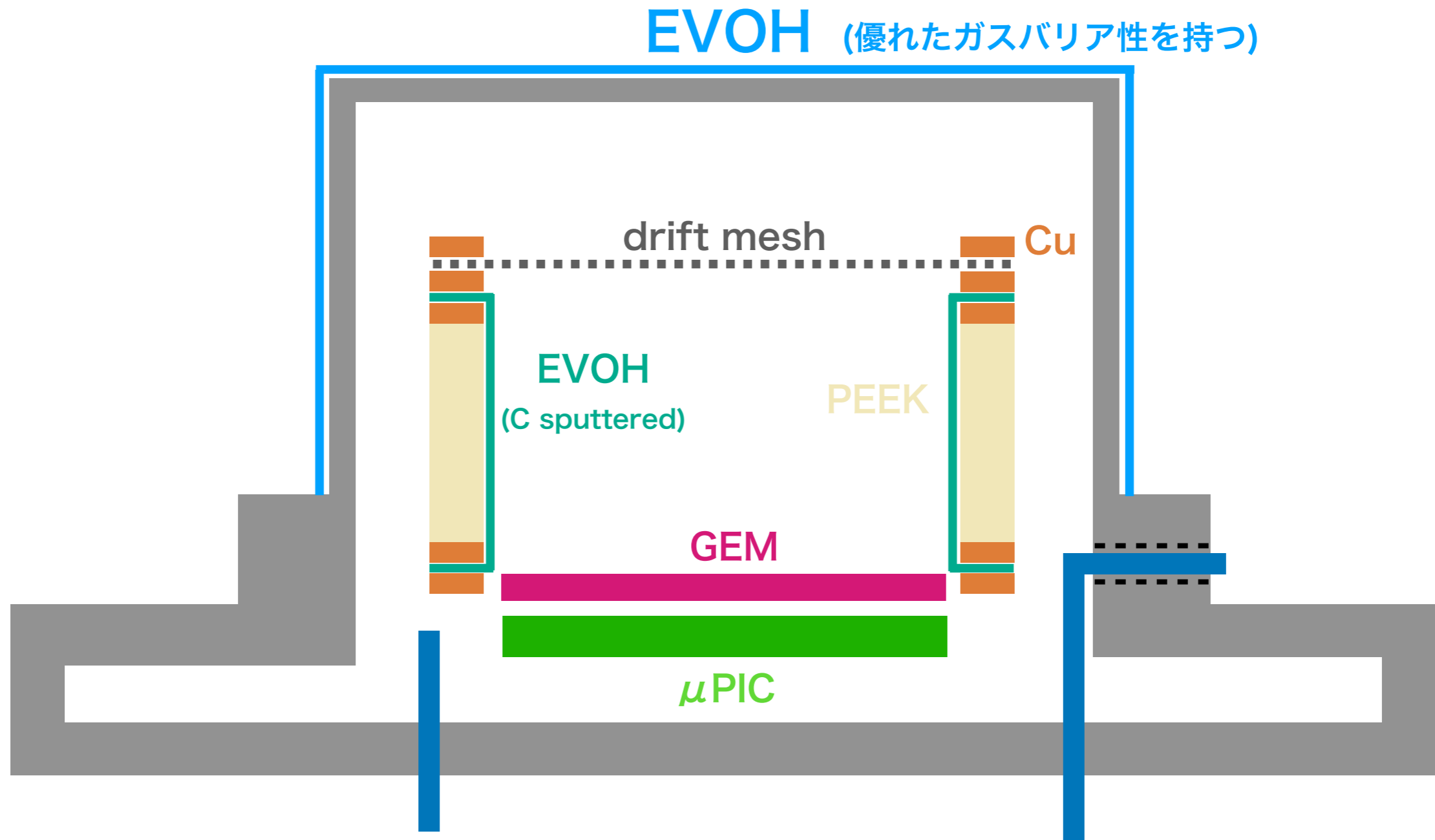
開発のモチベーション

- 検出器(n, γ)由来のBGは支配的ではないが
- 検出器の物質質量を削減すると、
 - 検出器材での(n, γ)反応 BGを削減
 - 入射中性子fluxの減少を抑制→ **S/N比の向上**
- Ar TPCは 1atm
→ 気密性さえ保てるならどれだけ薄くてもOK！



4. 低物質質量TPC

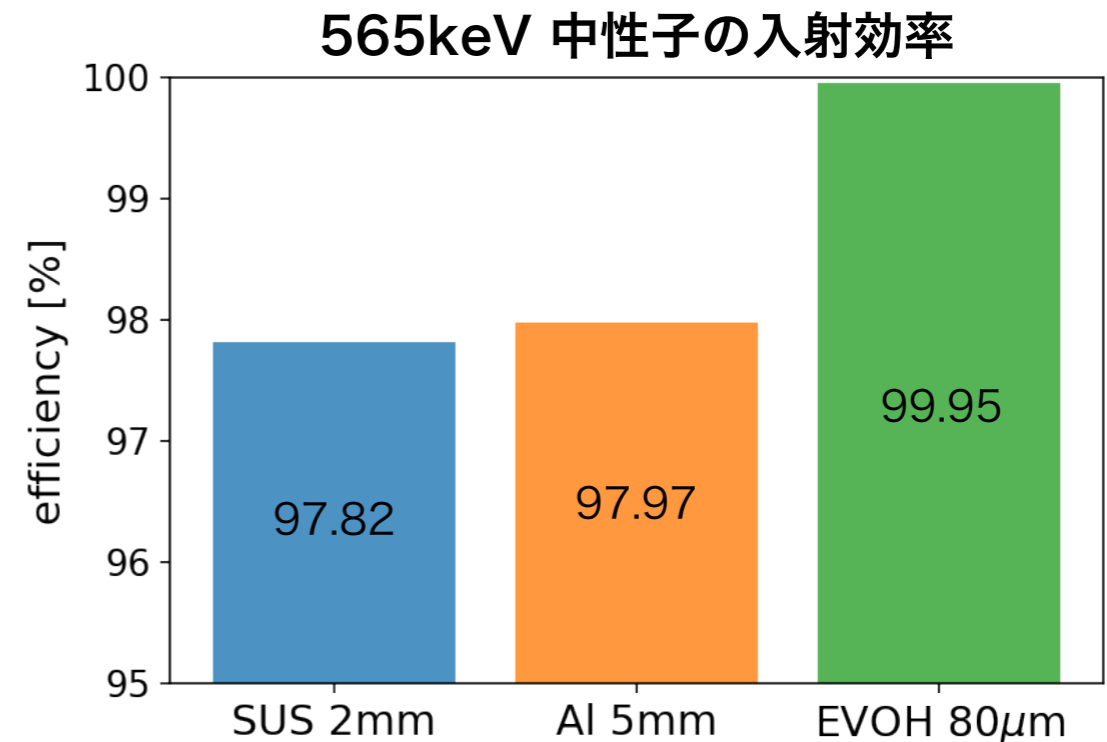
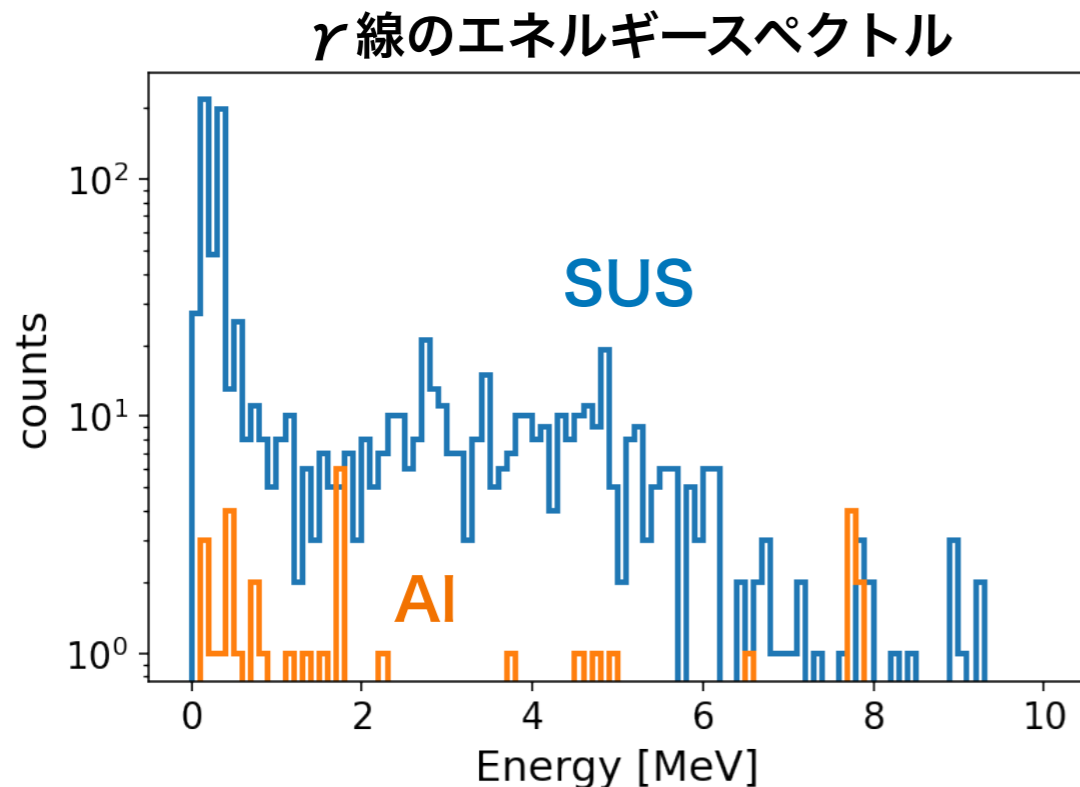
概念図



4. 低物質質量TPC

期待される効果

- 今回使用するEVOHは 厚み $80\mu\text{m}$
- SUS(2mm)、Al(5mm) の容器を使用する場合と比べてかなり改善できると見積もられた (Geant4)
- γ 線の入射レート は SUSと比べてざっと **1/400** 以上に低減
中性子の入射効率 は **99.95%** ↑

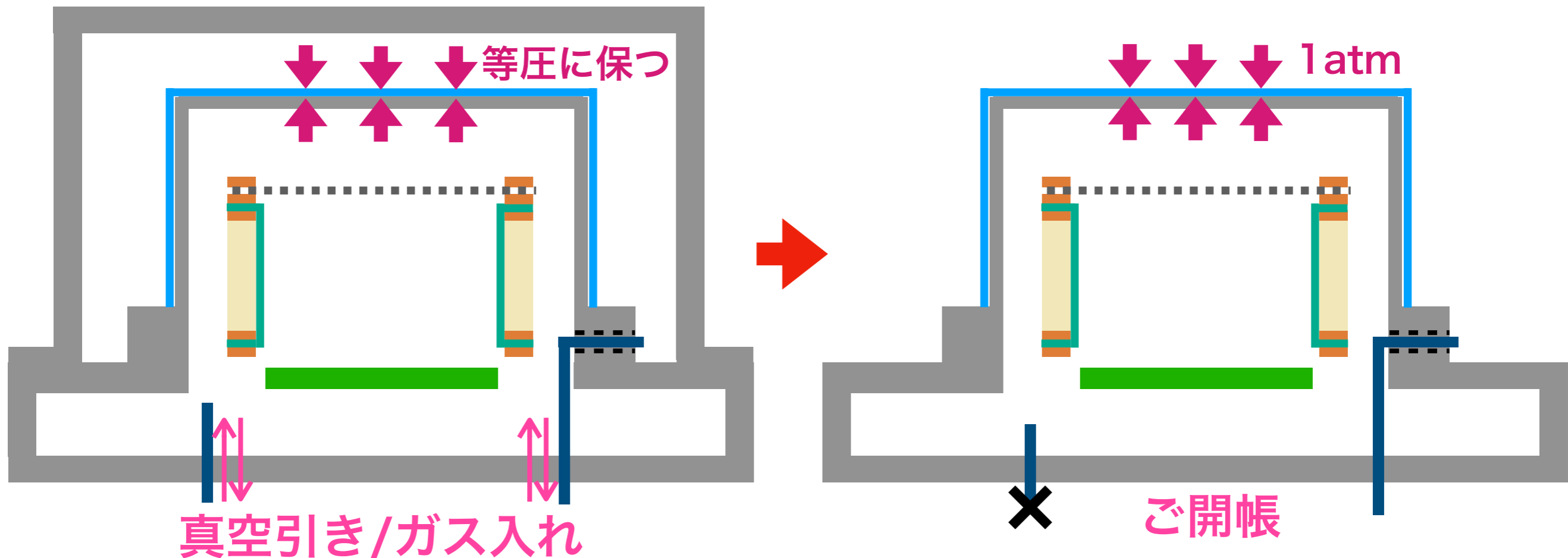


4. 低物質質量TPC

難しい点

EVOHは薄いので当然普通に真空引きはできない

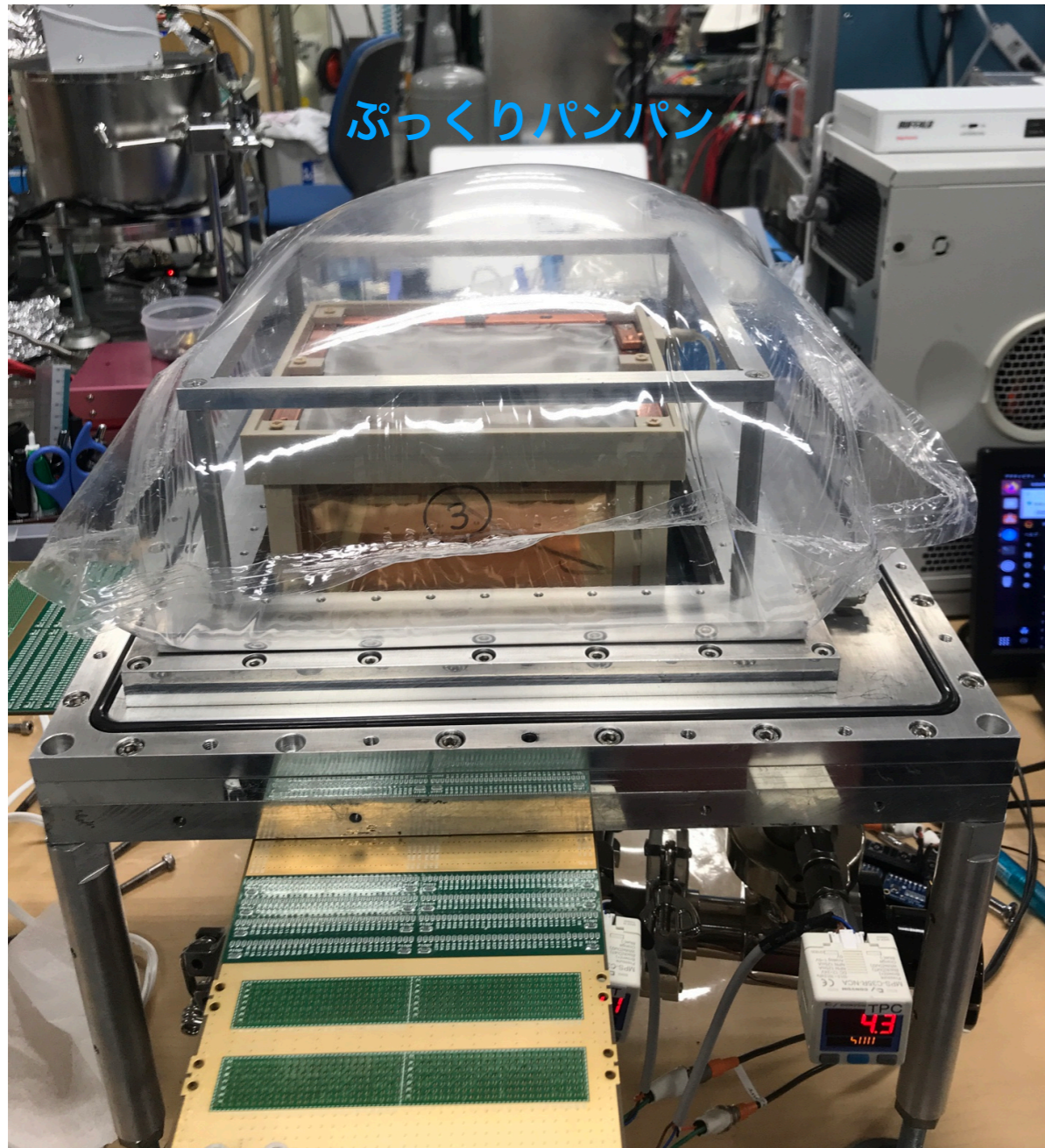
1. 内外の気圧を同程度に保ちながら同時に真空引き
2. 同時にガス入れ
3. 外容器を外すとできあがり



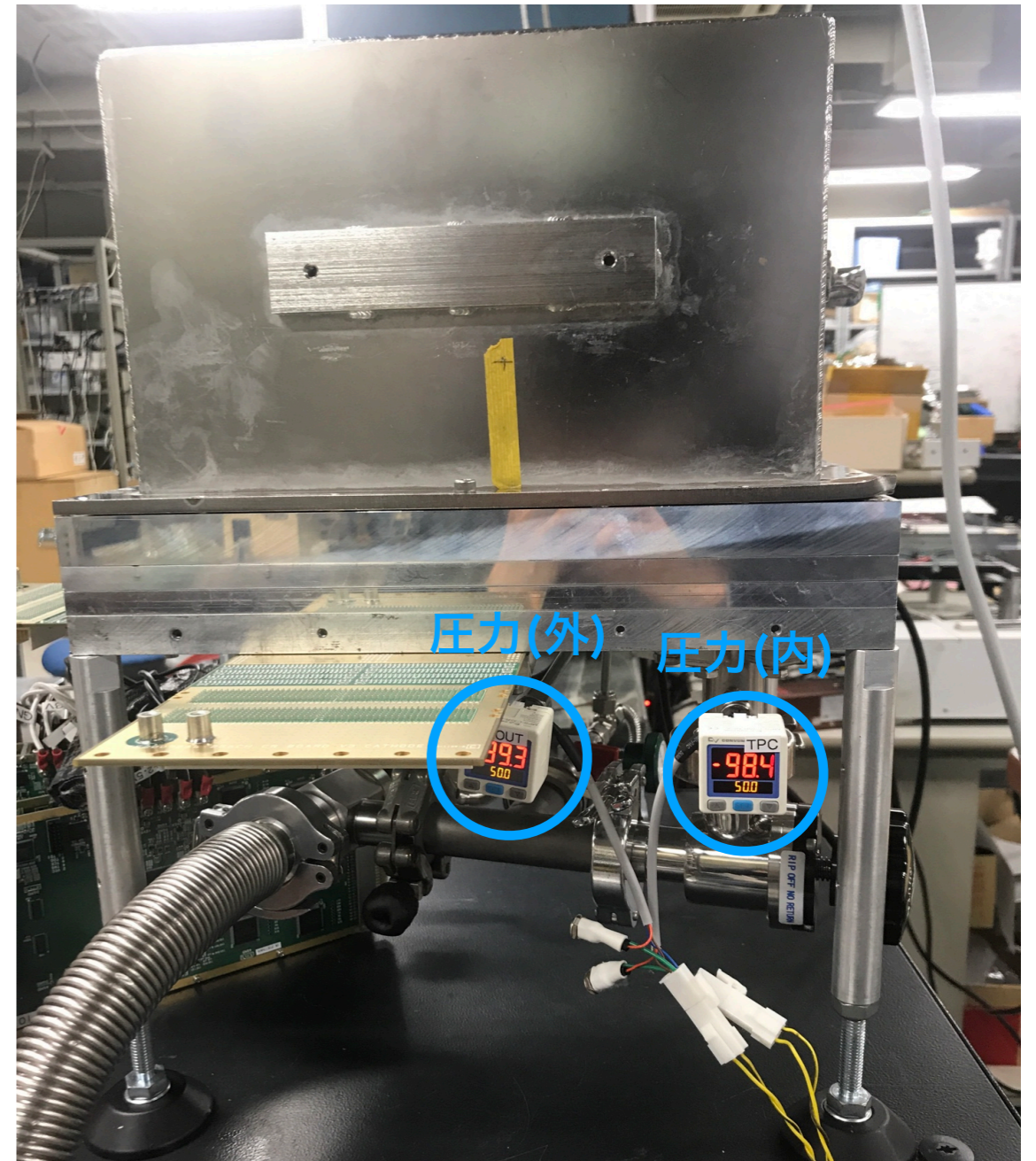
4. 低物質質量TPC

真空引き

リークチェック中 ...



真空引き中 ...



長時間の測定になるので、リークがないことは重要

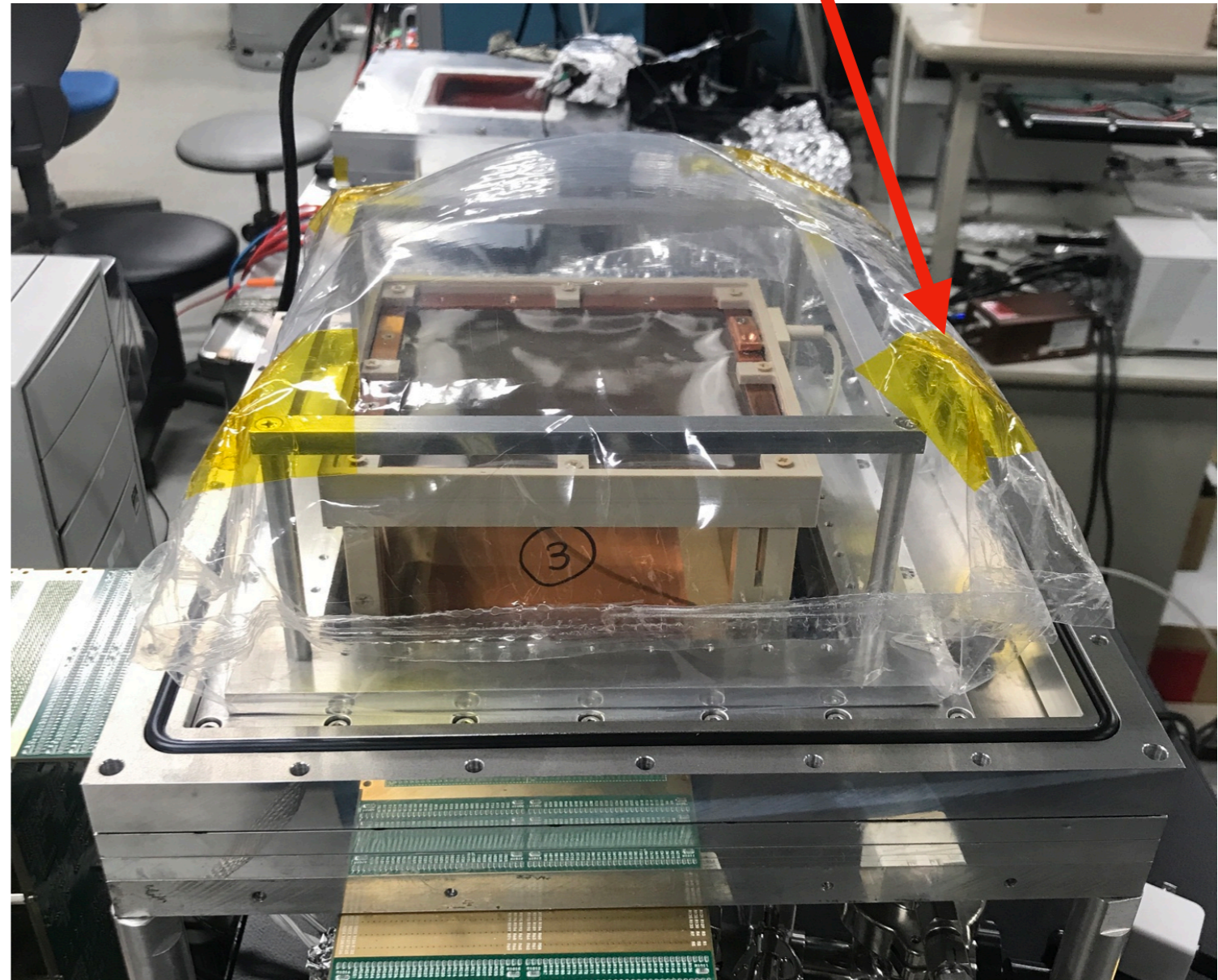
内と外で圧力差が大きくならないように調整

4. 低物質量TPC

ガス入れ

- 真空引きして、Ar 1atm 入れた様子
- EVOHの大きな損傷やあからさまなリークはなし
→ うまくいっていきそう
- 手法の確立を目指す

傷がついていたのでカプトンテープで補修



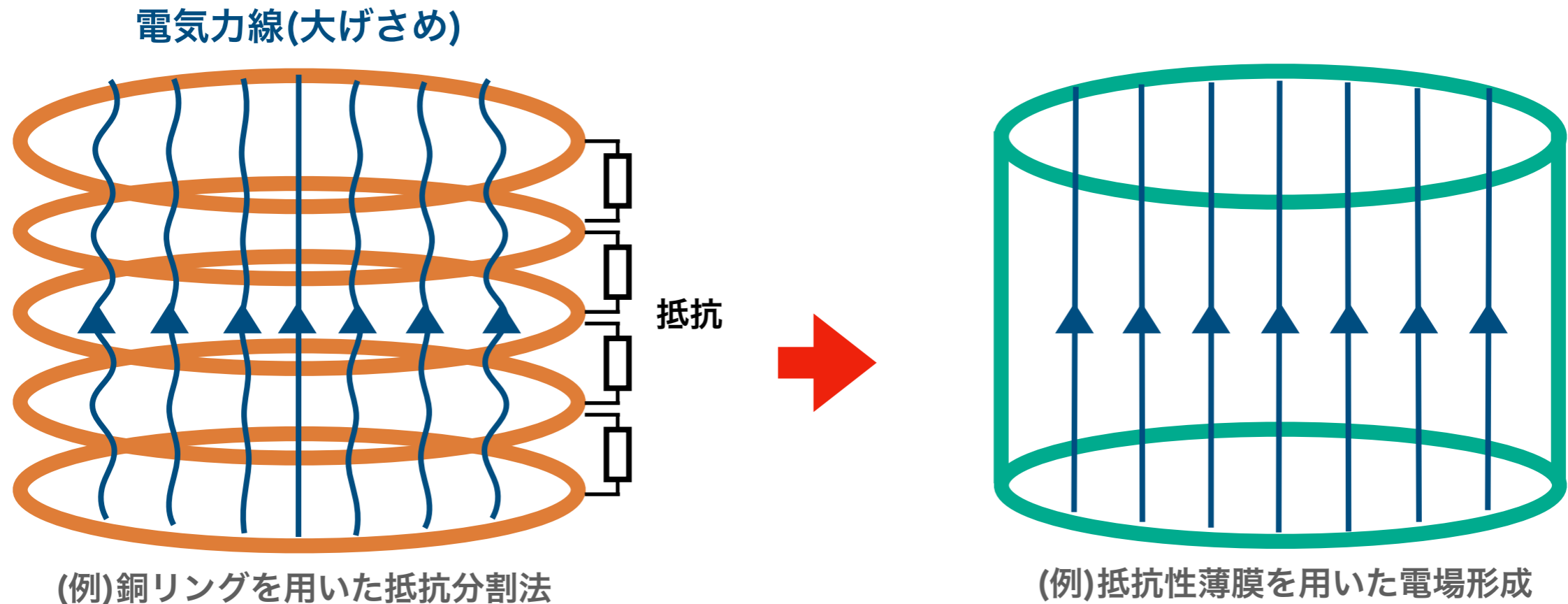


抵抗性薄膜による電場形成

5. 抵抗性薄膜による電場形成

フィールドケージ (FC)

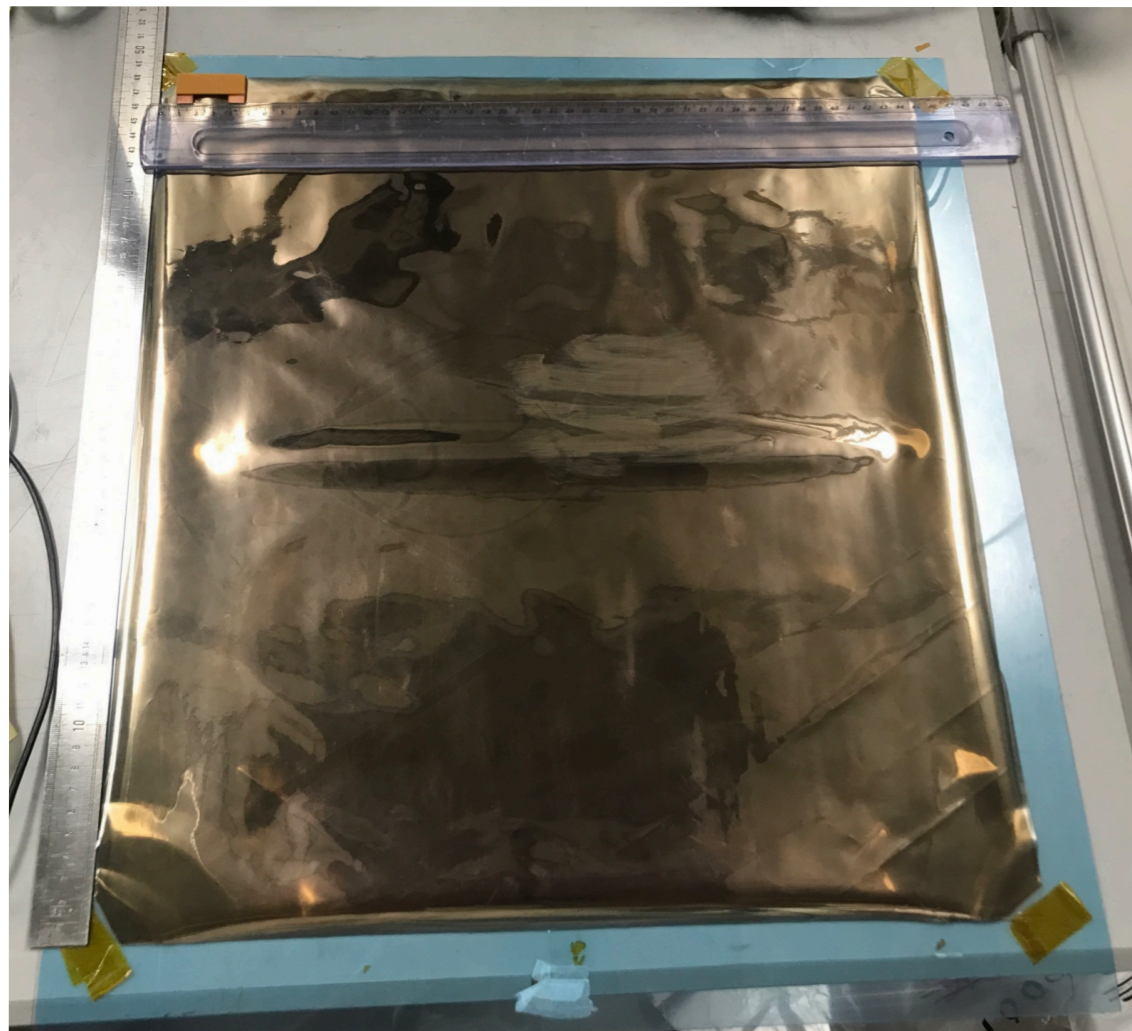
- 正確なイベント位置再構成が重要
→ FC内の電場構造に依存
- 従来の抵抗分割法を用いたFCでは**電場の非一様性**が少なからず存在
- **面抵抗を持った薄膜**を用いることで一様な電場を形成できる



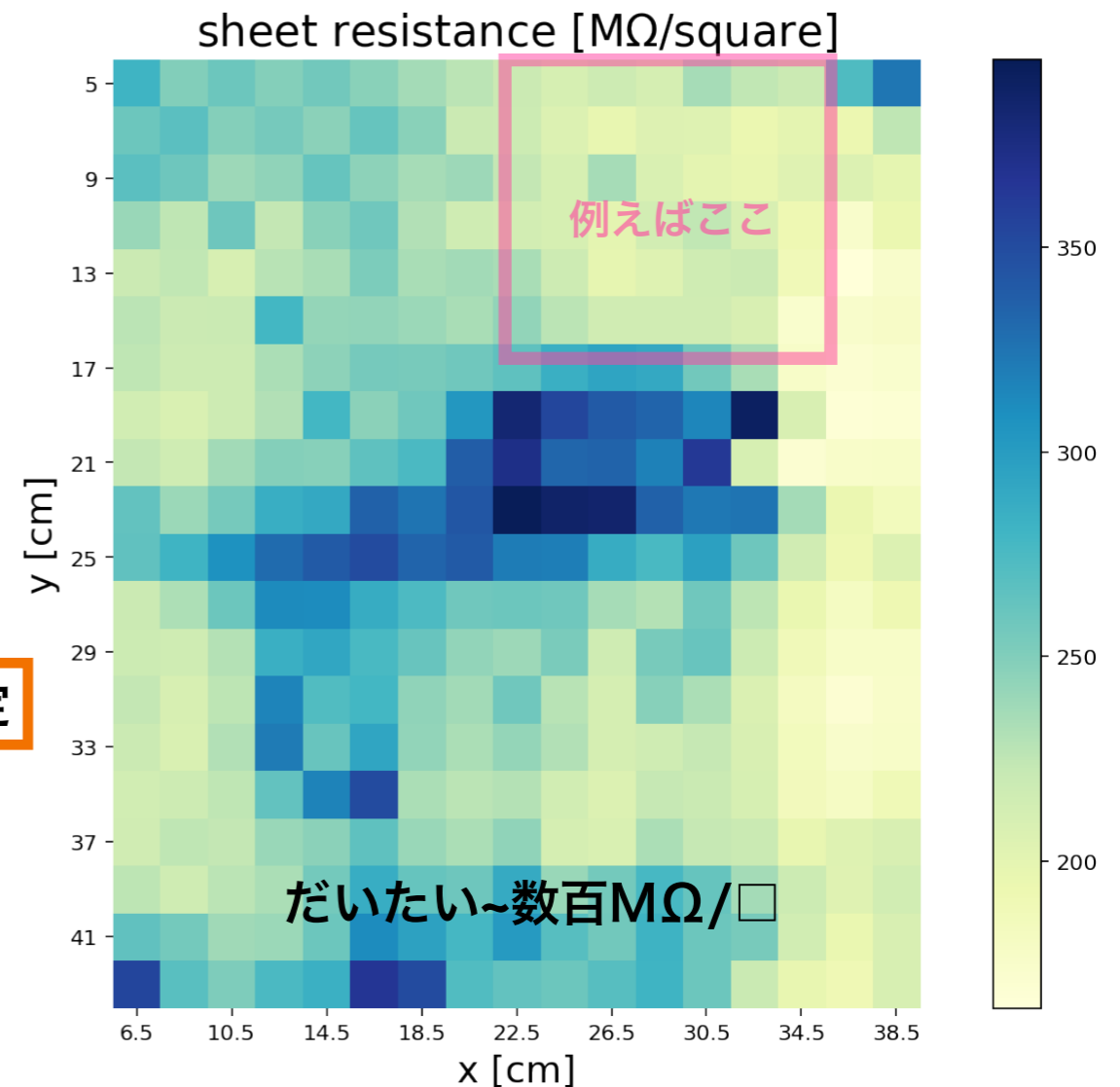
5. 抵抗性薄膜による電場形成

抵抗性薄膜

- 電場形成には**炭素スパッタリング**したEVOHを採用
- 一様な電場を形成するためには**一様な面抵抗**が必要
- 面抵抗を確認しながら一様なところを使う



面抵抗測定



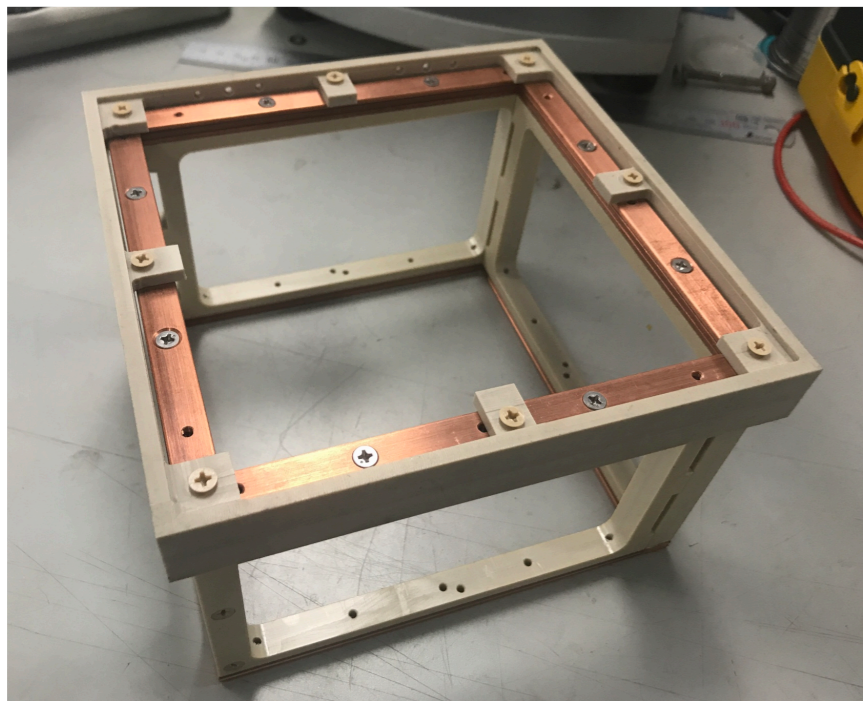
5. 抵抗性薄膜による電場形成

FC組み上げ

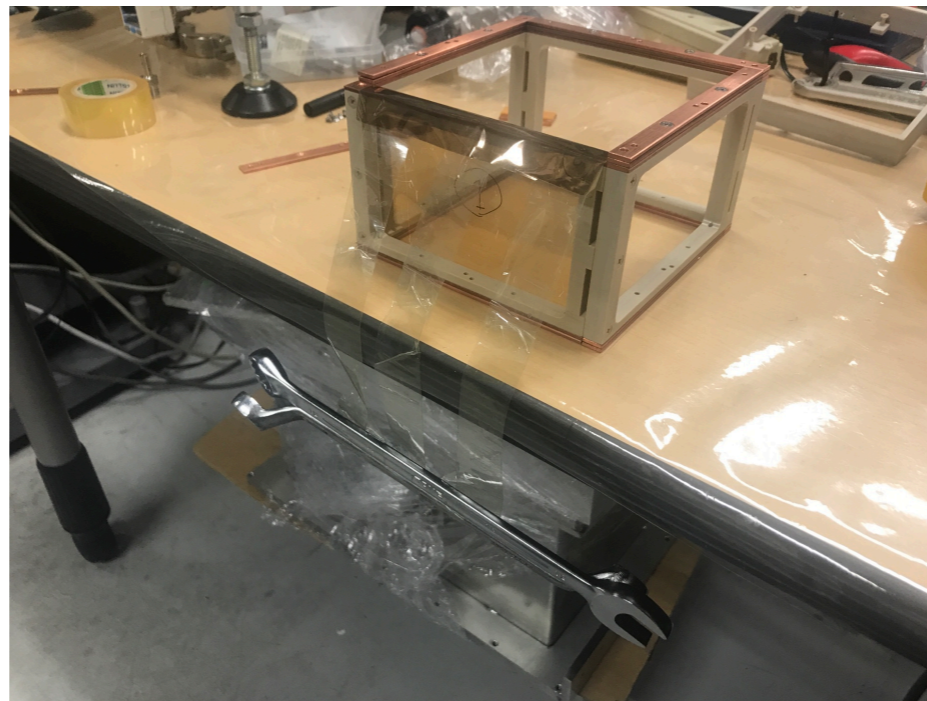
- PEEKの骨組み
- 銅電極に挟み込み
 - どうやら強く曲げると薄膜の抵抗値が上がるらしい
 - 一旦気にせずこれで実装していく

内側の面にCがスパッタされている

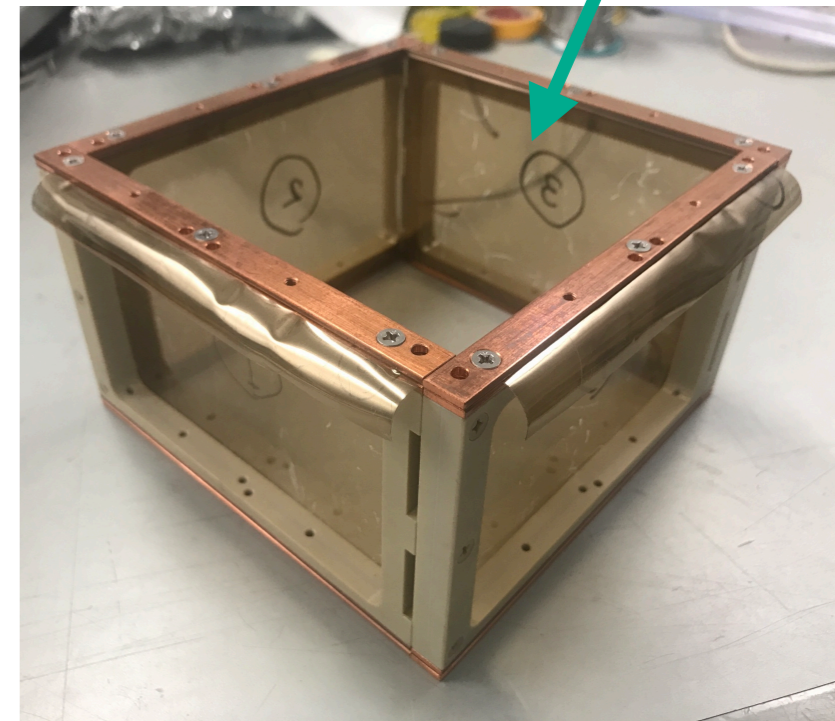
骨組み+銅電極



レンチ2個分の重さがちょうど良い



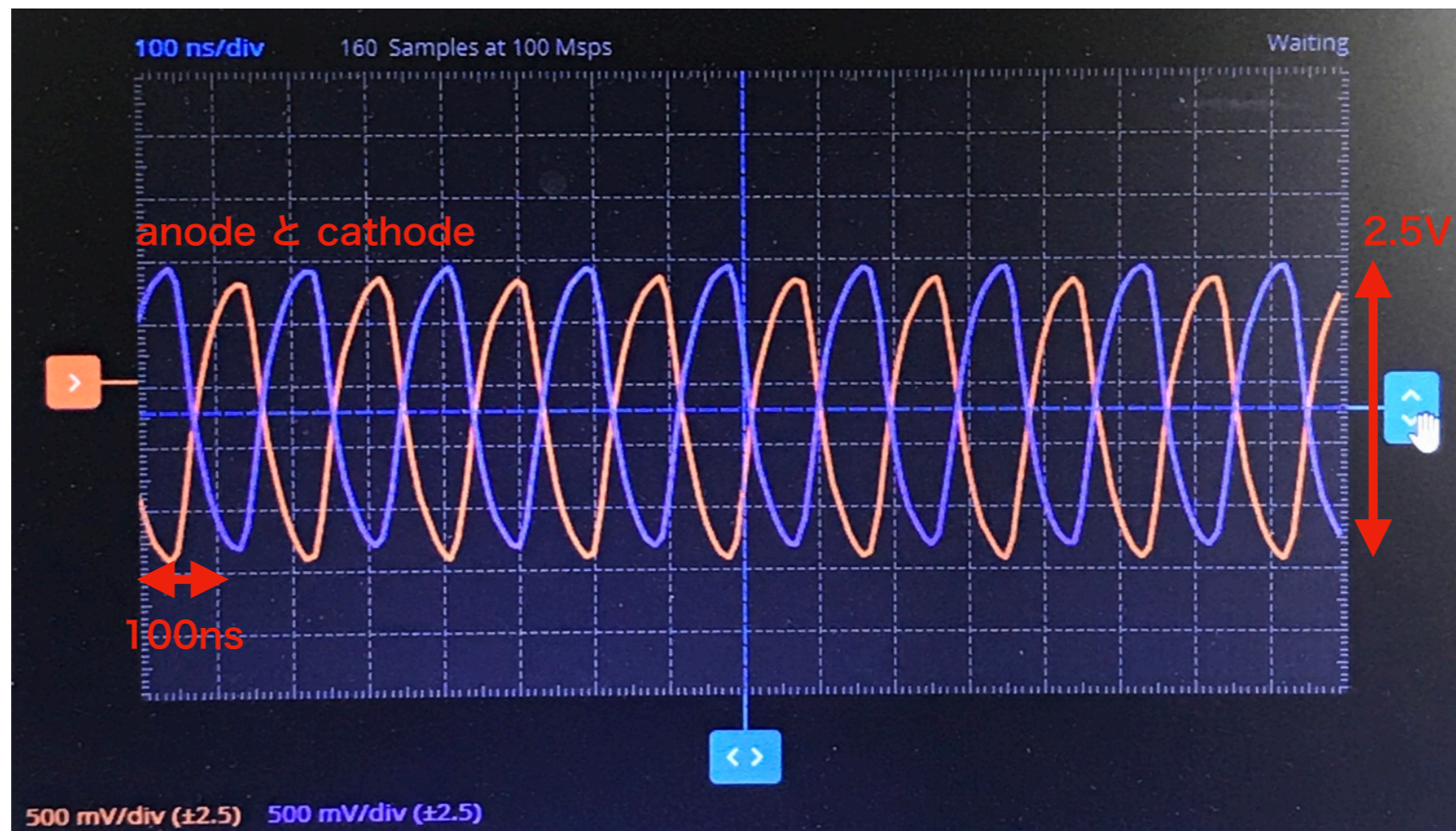
完成



5. 抵抗性薄膜による電場形成

進捗状況

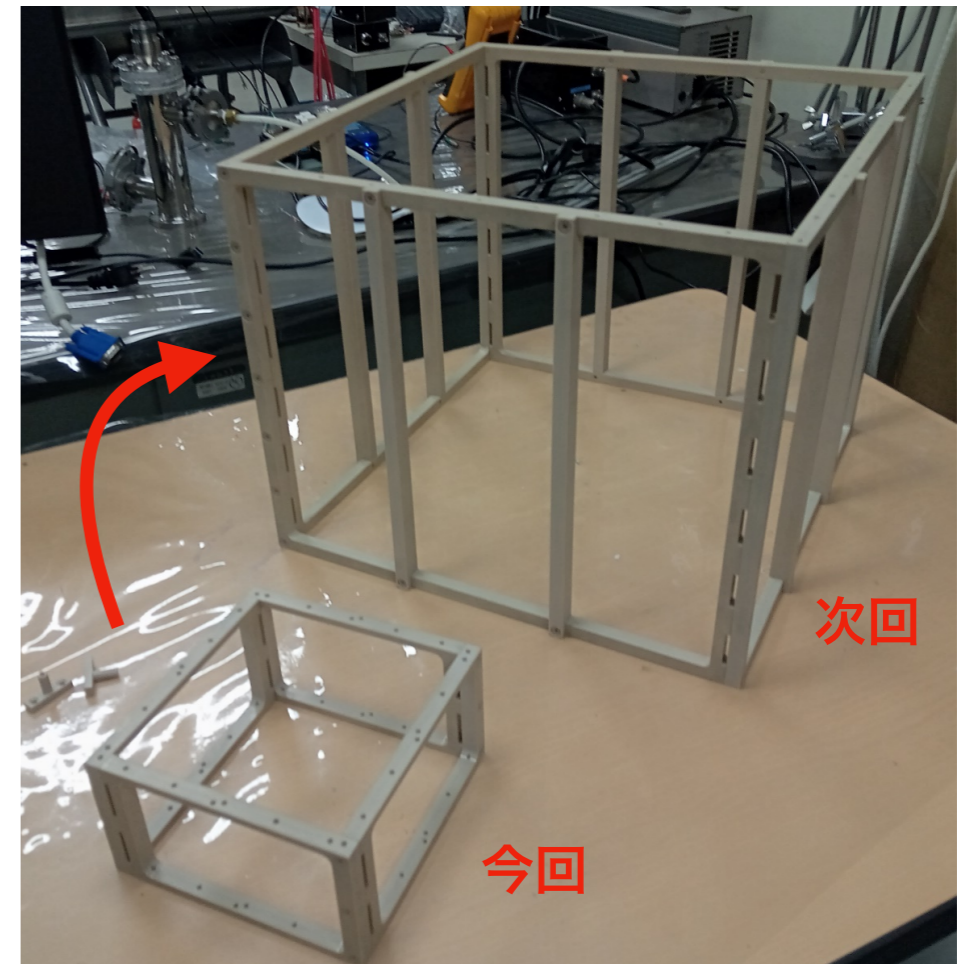
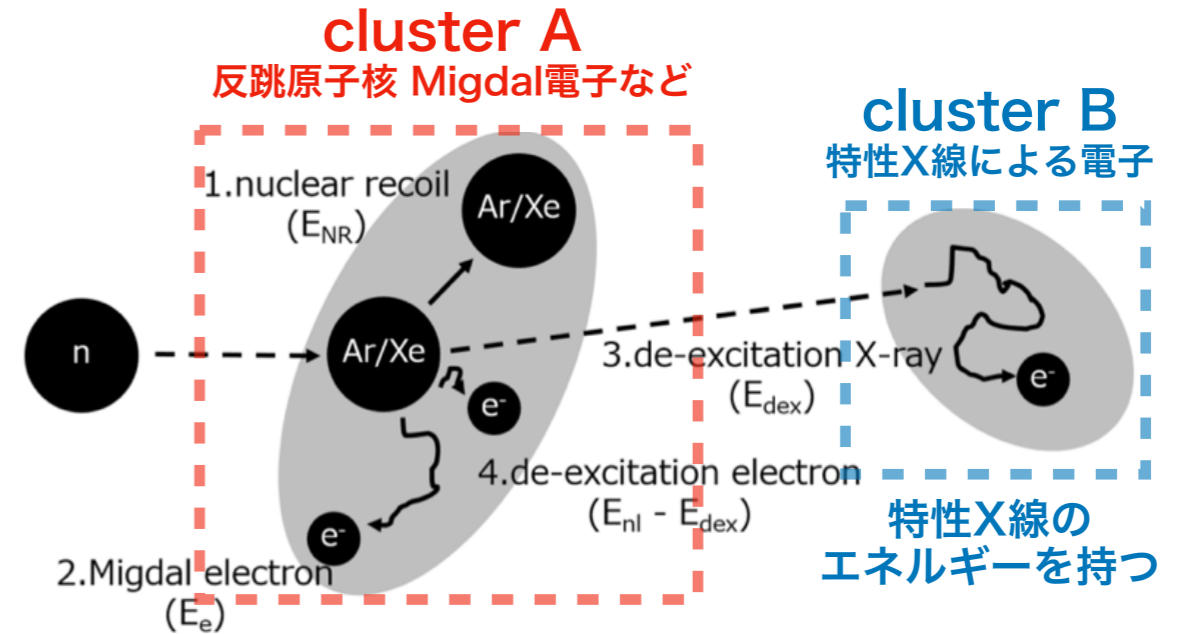
- first light を載せたかったが、謎のノイズに苦しめられている
- 解決して動作確認に移る



6. 今後の展望・まとめ

今後の展望

- 一様電場形成の確認
- 2-cluster イベントのデモ
- 今回見る信号は
反跳原子核&電離電子 + 3keV γ
BGの γ 線はMeVオーダーが多い
→ 飛跡から γ 線BGの判別できる？
- 基本的にSUSよりもAIの方が
(n, γ)断面積は1オーダーほど小さい
→ できるだけAIを使う
- 30cm サイズ検出器の製作



6. 今後の展望・まとめ

まとめ

- Migdal効果は **低質量WIMPs** 探索にとって非常に嬉しい存在
- **Ar/Xe ガスTPC**を使って観測を目指す
- 神戸では低物質量TPCを作成中、ガス入れの動作検証までできた
- 3月に第1回ビーム試験を計画中 @産総研
→ まずは BG study・検出器応答の確認から
結果をお楽しみに！！